



基于电声脉冲法的油纸绝缘介质直流空间电荷的特征量提取及分析

唐超^{①②*}, 廖瑞金^②, CHEN George^③, 杨丽君^②

① 西南大学工程技术学院, 重庆 400715;

② 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

③ School of Electronics and Computer Science, University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, UK

* E-mail: tangchao_1981@163.com

收稿日期: 2010-09-03; 接受日期: 2010-12-13

国家重点基础研究发展计划 (“973”计划) (批准号: 2009CB724505~1)、西南大学博士基金(批准号: SWU110038)和西南大学中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: XDJK2010C020) 资助项目

摘要 油纸混合绝缘介质作为许多关键直流输电设备的主要绝缘材料, 其空间电荷特性既影响材料的介电强度, 又关系着直流输电设备运行稳定性和可靠性. 目前国内外针对油纸绝缘介质空间电荷特性的研究尚处在对测试结果的客观描述及现象解释阶段, 如何通过数据挖掘进行测试结果的特征量提取, 进而更加深入地探究油纸介质直流空间电荷特性, 迫切需要研究. 本文基于大量前期测试数据, 进行油纸介质空间电荷特性的数据挖掘, 提取特征参量, 对比分析了不同情况下油纸介质内部注入空间电荷总量、视在电荷迁移率等重要特征参数的变化规律. 基于等温衰减电流法建立了油纸绝缘介质空间电荷的去极化特性与其内部陷阱分布之间的关系, 实现了经由空间电荷的消散特性来近似计算介质内部陷阱深度信息. 并且首次得到了油纸介质直流空间电荷的指数注入(消散)公式, 指明了公式中相关参数的物理意义, 为实现对油纸介质内部空间电荷特性的预测和模拟奠定了基础.

关键词

油纸绝缘
空间电荷
直流
特征量提取

近年来高压直流输电网络的飞速发展不断在提升着对直流电力设备运行安全的要求. 油纸混合绝缘介质作为许多关键直流输电设备的主要绝缘材料, 其空间电荷特性既影响材料的介电强度, 又关系着直流输电设备运行稳定性和可靠性. 因此, 油纸绝缘介质空间电荷特性的研究对提高绝缘材料的物理化学性能及其电气性能, 提高直流输电设备运行可靠性, 保证整个直流输电网络安全运行都有着十分重要的意义.

目前国际上已经普遍认可, 由于空间电荷对电场的这种畸变作用, 空间电荷对绝缘材料的电导、击穿破坏、老化等各方面性能都有明显的影响^[1]. Tanaka, Takada 等学者^[2~6]从 20 世纪 70 年代起就致力于空间电荷行为的研究. Mazzanti, Montanari 等人^[7~9]对不同聚乙烯材料进行了空间电荷特性探索, 并对空间电荷的阈值场强, 电荷视在迁移率特征量进行了深度挖掘. 国内西安交通大学的屠德民和张治文等人从 20 世纪 80 年代后期开始进行了 PEA 法空间

电荷的测量方法和装置的研究^[10~16]。此外,雷清泉等人^[17],周远翔等人^[18~20]在空间电荷测量技术方面也开展了不少研究。

对于油纸绝缘介质而言,1994年起,ABB瑞典公司的运用压力波扩展法(Pressure Wave Propagation, PWP)对油纸空间电荷进行了探索,但受到了当时设备精度的限制,结果不太理想。1997年, Peter Morshuis 和 Marc Jeroense^[21, 22]首次采用电声脉冲法(Pulsed Electro-Acoustic, PEA)对直流高压下的油纸材料进行了测试,但是测量温度对空间电荷的影响并未考虑在其中。在1998年, Liu 等人^[23, 24]研究了室温下湿度与浸油绝缘合成纤维板中空间电荷的关系,采用 PWP 法分析了试品湿度从 0.3%~1.7%变化时空间电荷的形成、积聚和分布。Ciobanu 及 Pfeiffer^[25]在2003年研究了直流电力电缆中绝缘油纸的空间电荷包演变过程,通过 PEA 方法尝试寻找一些能准确表征空间电荷形成现象的特征参量。2004年,他们应用 PEA 法,研究了伽马射线对油纸绝缘系统中空间电荷及场强特性的影响^[26]。

在国内,2008年,周远翔等人^[27]采用 PEA 法对浸油纸板进行了空间电荷特性的测量和分析,对直流电场下油纸绝缘的空间电荷特性展开了研究,但目前的结果仅仅是简单地探索,还未深入研究。从2008年开始,重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室与英国南安普顿大学 Chen 合作,对多种条件下油纸绝缘介质的直流空间电荷特性进行了较为系统地研究^[28~30]。

本文在基于电声脉冲法的油纸绝缘介质直流空间电荷试验的大量前期测试数据及规律分析的基础上,提取特征参量,对比分析了不同情况下油纸介质内部注入空间电荷总量、视在电荷迁移率、陷阱能级分布等重要特征参数的变化规律,并且首次得到了油纸介质直流空间电荷的指数汇聚(消散)公式,指明了公式中相关参数的物理意义,为对油纸介质内部空间电荷特性的预测和模拟奠定了基础。

1 试验材料及试验设备

试验所采用的绝缘油为 Nynas Oil Company 生产的 Nytro 10X 矿物油和 Croylek Ltd.公司生产的普通牛皮绝缘纸(kraft paper),厚度为 60 μm 。其中, Nytro 10X 矿物油为抗氧化油,具有较好的电气性能和抗氧

化性能,广泛应用于国外各种型号的变压器中。

采用由日本 Fivelab 公司生产的基于电声脉冲法 (PEA) 的空间电荷测量设备。直流电源 0~20 kV, 脉冲宽度 5 ns, 幅值 0~600 V, 压电传感器(PVDF)薄膜厚度为 9 μm , 上电极覆盖覆盖半导电层的铜电极, 直径 8 mm, 外部铜屏蔽层直径 60 mm, 下电极铝电极。该设备对于油纸介质的分辨率大概为 9 μm 。(试验过程及前期分析数据如文献[30]所示。)

2 总电荷量

在直流电场作用下,空间电荷会注入到电介质内部,并在局部汇聚,畸变介质内部电场分布,储存电机机械能,并引起电荷的复合和激励,导致材料的破坏。电介质内部的空间电荷的总量(Total Charge),涉及到介质材料的电性能与其物理、化学、微观结构特性,是对材料自身电荷输运特性的表征。

采用 PEA 测得油纸介质内部空间电荷的分布情况,其内部总电荷量可以由下式计算得到:

$$Q(T) = \int_0^d |\rho(x, t)| S dx, \quad (1)$$

其中, $\rho(x, t)$ 是电介质内部电荷密度, S 是电极表面积, d 是电介质样本厚度。

2.1 不同外加直流电压

在常温下(20°C),从加压试验曲线(图1)上看,当外加直流电压为 4 kV 时,三层油纸介质内部电荷总量随着加压时间的延长,先略有波动,再逐渐稳定。电压升到 6 kV 时,总体看来油纸介质内部总电荷量先略有减少再逐渐趋于稳定。而 8 kV 时,总电荷量有小幅波动最终也逐渐稳定。

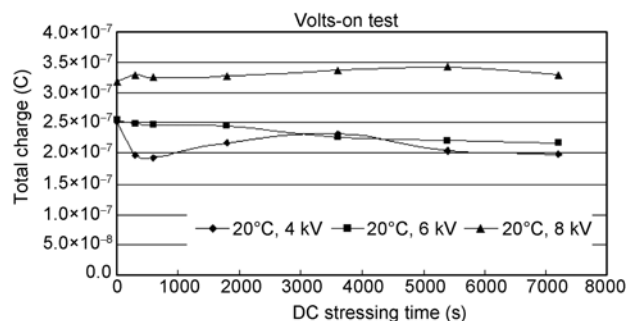


图1 油纸介质内部总电荷量和加压时间的关系(20°C)

通过将加压试验时的总电荷量 $Q(t)_{\text{on}}$ 减去瞬时去压(即突然撤去外加电压, 在 5 s 左右的短暂时间内测量样本的空间电荷特性, 然后立刻恢复加压状态)时的总电荷量 $Q(t)_{\text{off}}$, 可以得到在瞬时去压的短暂时间内所失去的快速运动电荷的信息, 而这部分电荷则较为直观地反映了油纸介质内部极浅陷阱的相关信息. 通过对比快速运动电荷和慢速运动电荷近似稳定时的总电荷量(图 2), 可以看到, 在未老化的油纸绝缘介质中, 快速运动电荷的数量基本上是慢速运动电荷数量的 2 倍.

在 20°C 时, 去压后油纸介质内部总电荷量变化随着去压时间的延长, 规律如图 3 所示. 总体上看, 空间电荷总量的消散呈现指数下降规律, 即去压前期下降较快, 之后电荷消散速率逐渐减慢.

2.2 不同测试温度

① 40°C

当测试温度升高到 40°C, 从加压试验数据上看(图 4), 当外加直流电压为 4 kV 时, 三层油纸介质内

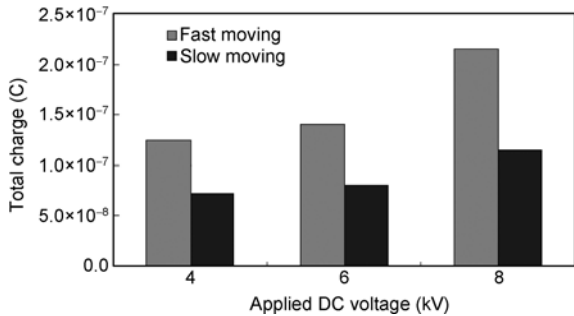


图 2 油纸介质快速运动电荷和慢速运动电荷在近似稳定时的总电荷量(20°C)

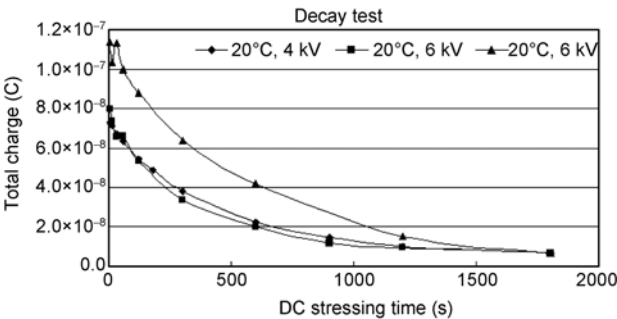


图 3 去压试验时油纸介质内部总电荷量和去压时间的关系(20°C)

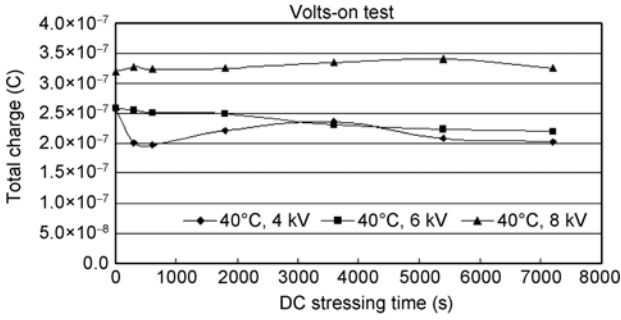


图 4 油纸介质内部总电荷量和加压时间的关系(40°C)

部电荷总量随着加压时间的延长, 先减少再增加, 加压 100 min 后逐渐趋于稳定的趋势. 当电压升到 6 kV 时, 与 20°C 时情况类似, 总的看来油纸介质内部总电荷量略有减少再逐渐过渡到稳定状态. 而 8 kV 时, 油纸介质内部总电荷量有小幅波动最终也逐渐稳定.

从 40°C 下三层油纸介质内部空间电荷总量消散情况(图 5)可看到, 尽管测试温度升高了 20°C, 空间电荷消散情况基本呈现指数下降规律. 去掉电压初期, 由于介质内部残余电场较高, 空间电荷快速脱陷中和, 使得电荷总量下降较快. 随着去压时间的延长, 一方面是介质内部残余电场的作用减弱, 另一方面, 较浅陷阱内的电荷大部分已脱离陷阱束缚, 剩余的是需要更多能量才能变成自由电荷的被较深陷阱束缚的空间电荷, 因此总电荷量衰减的速率会不断减小.

② 60°C

当测试温度上升到 60°C, 加压试验时, 不同外加直流电压等级下油纸介质内部空间电荷的总量随加压时间变化曲线如图 6 所示. 油纸介质内部总电荷量变化与 20°C, 40°C 时情况类似, 均随着外加直流电压的升高而增加. 4 和 6 kV 时, 随着加压时间的延

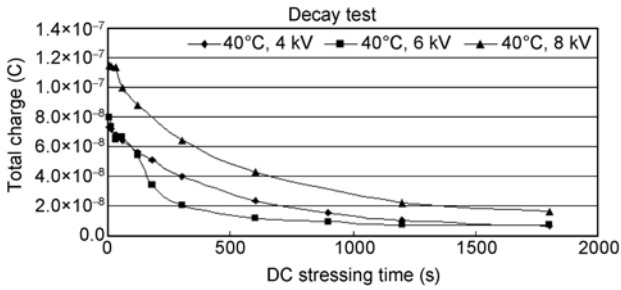


图 5 去压试验时油纸介质内部总电荷密度和消散时间的关系(40°C)

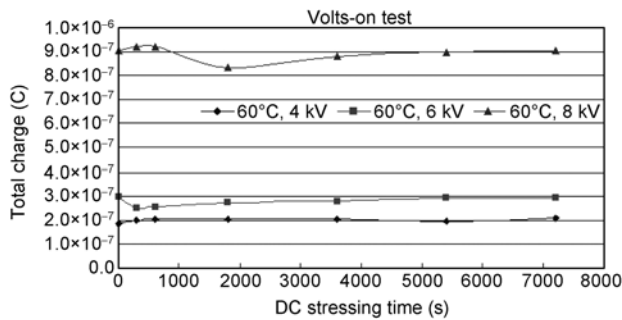


图6 油纸介质内部总电荷量和加压时间的关系(60°C)

长, 介质内部总电荷量波动不大, 很快就趋于平衡. 而 8 kV 时, 油纸介质内部总电荷量出现显著升高, 随着加压时间的延长出现小幅波动, 并最终也趋于稳定.

综合分析 3 个温度和 3 个电场作用下油纸介质内部快速运动电荷及慢速运动电荷信息, 可以看到, 在本文试验中的“极端”情况下(60°C, 8 kV), 即相对高温高场条件下, 快速运动电荷和慢速运动电荷量都会大幅增加, 使得油纸介质内部自由载流子数目增多, 电子运动剧烈, 引起局部放电的产生, 并最终导致材料的击穿. 因此, 应该特别重视相关设备在高温高场条件下运行时的空间电荷特性.

3 视在电荷迁移率

空间电荷在电介质内部的迁移过程可以是在加压情况下即所谓的极化过程(polarization), 也可以是在去压的情况下即去极化过程(depolarization). 一般来讲, 加压过程易于受到外加直流电压等级及其他周围环境因素的影响, 而去压时的情况能够更为准确地反映及评估电介质内部空间电荷的迁移, 进而准确反映电介质自身特性. 因此, 在去压情况下的电介质内部的空间电荷迁移率往往作为对材料空间电荷特性量化的一个重要指标. 空间电荷的迁移率 μ 可由下式得出:

$$\mu = v/E, \quad (2)$$

式中, v 是电介质内部电荷运动速率, E 是局部电场值.

进一步通过推导可以得出以下空间电荷迁移率 $\mu(t)$ 的简化计算公式:

$$\mu(t) = \frac{2\varepsilon}{q(t)^2} \frac{dq(t)}{dt}, \quad (3)$$

式中, ε 为被测电介质材料的介电常数, $q(t)$ 是电荷密度.

需要注意的是, 上述公式是对于空间电荷运动性能的严格近似, 因此定义为“视在电荷迁移率”. 虽然有别于严格意义上的电荷迁移率, 但其优势在于一旦通过 PEA 测试获得了电介质内部空间电荷的去极化数据, 则可简单快捷地计算得到其视在电荷迁移率数据, 从而获取介质内部空间电荷的脱陷信息, 这对电介质绝缘性能的研究极为重要.

3.1 不同外加直流电压

20°C 时, 在不同外加直流电压下油纸绝缘介质内部视在电荷迁移率随短路时间的变化关系如图 7 所示. 总体看来, 电荷的迁移规律呈现先下降, 再增加到某一极大值, 最后再缓慢下降的趋势. 前期较短时间内(60 s 左右)会有小幅波动, 在视在迁移率达到最大值点后的下降阶段比较明显的反映了空间电荷的迁移信息. 外加直流电场越大, 视在电荷迁移率(最大值)也越大, 这是因为外加电场增加使得油纸介质内部储存的空间电荷量增多, 去掉电压后, 其内部残余电场值较大, 电荷的运动速率在这个相对较大的电场影响下也比较高. 而在短路 300 s 以后, 3 个电压等级下电荷的迁移率基本呈现稳步下降的趋势.

与前面部分总电荷量衰减曲线相对应, 短路后试样中的空间电荷随时间增加逐渐减少. 残余空间电荷量与陷阱的深度或密度相关, 当油纸绝缘介质中陷阱较深或密度较高时, 电场作用下电荷不易迁移, 会导致较多的电荷积聚. 同时, 电荷随时间衰减

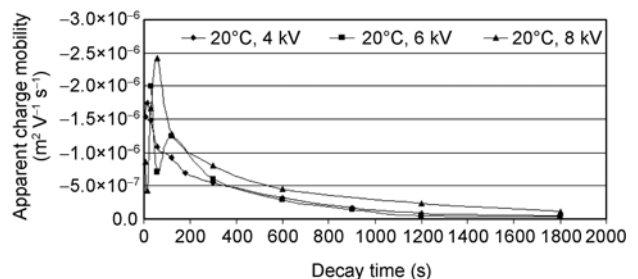


图7 油纸介质内部空间电荷视在迁移率与去极化时间的关系(20°C)

曲线的斜率也反映出视在电荷迁移率的大小, 斜率越大, 迁移率越大; 反之亦然。

3.2 不同测试温度

① 40°C

40°C 时(图 8), 在去掉外加电压后, 油纸绝缘介质中空间电荷视在迁移率整体趋势与 20°C 时类似, 开始阶段(200 s 以内)振动上升, 达到最大值后, 再逐渐下降。

电荷视在迁移率随时间的衰减变化, 也是反映不同能级(由浅到深)陷阱电荷逐渐脱陷的过程。但是 PEA 设备所测量的电荷密度信息, 只能反映油纸介质内部浅陷阱中的载流子信息。因此, 本节所讨论的陷阱信息是油纸介质内部不同深度浅陷阱中的载流子随时间的脱陷过程。

从图 8 可以看到, 电荷视在迁移率的最大值与 20°C 时相比明显减小, 可见温度升高到 40°C, 使得油纸介质内部较深浅陷阱数量增加, 尽管都是浅陷阱, 但是相对较深的浅陷阱对空间电荷的束缚能力较大, 电荷的视在迁移速率变低。

② 60°C

60°C 时, 在去掉外加电压后, 油纸绝缘介质中空间电荷视在迁移率随短路时间变化规律如图 9 所示。可以看到, 外加直流电压越高, 电荷视在迁移率越大, 而电荷迁移率的变化情况基本是先快速下降, 再逐渐趋于平稳的一个过程。前阶段快速下降过程反映了介质内部被相对较浅陷阱束缚的空间电荷的快速脱陷过程。而后期阶段缓慢减低过程反映的则是被相对较深陷阱束缚的空间电荷的脱陷过程, 在这个阶段, 外加电场使得油纸介质内部的较深陷阱有所增多, 但前面已经指出, 尽管陷阱能级相对较深, 但是此处讨论的仍属浅陷阱范畴, 在更高的直流

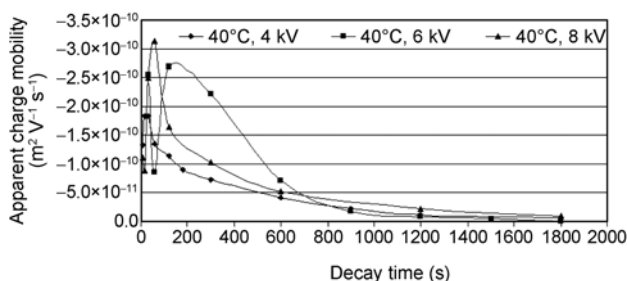


图 8 油纸介质内部空间电荷视在迁移率与去压时间的关系(40°C)

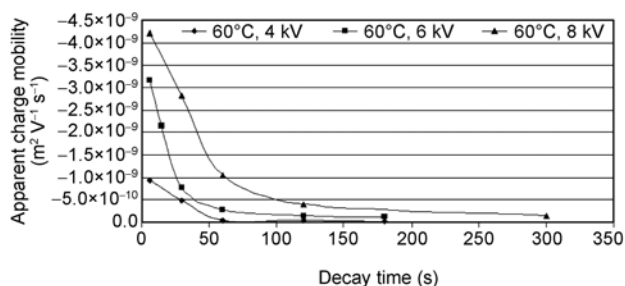


图 9 油纸介质内部空间电荷视在迁移率与去压时间的关系(60°C)

电压作用下, 更多的浅陷阱被激发, 储存了更多的空间电荷, 导致了去掉电压之后, 电荷视在迁移率在后期阶段随原外加电压值增大而升高的趋势。

结合 3 个温度下的图谱可以发现, 外加直流电场对油纸介质内部较浅陷阱有一定的激励作用, 形成新的浅陷阱, 从而增加较浅陷阱密度, 或是外加直流电压在一定程度上降低了油纸介质内部陷阱深度, 使得在较高电压等级下的电荷视在迁移率相对较大。

为了进一步分析温度对油纸介质空间电荷视在迁移率的影响效应, 取 4 kV 时 3 个不同温度下的电荷迁移率如图 10 所示。可以看到, 20°C 时的电荷视在迁移率远远高于 40°C 和 60°C 时的值, 从介质内部陷阱形成的角度来分析, 温度的升高会激发较深陷阱的产生, 使得油纸介质内部相对较深陷阱密度大大增加, 从而降低了电荷视在迁移率。

因此, 温度和电场对油纸介质的电荷视在迁移率有不同的作用机制: 在相同温度下, 较高的电场在一定程度上会降低油纸介质内部陷阱深度, 使得空间电荷视在迁移率升高; 而温度的增加则会激发油纸介质内部较深陷阱的产生, 束缚载流子能力加强, 使得空间电荷视在迁移率较低。

需要指出的是, 从目前的实验结果来看, 温度及电场对油纸介质内部空间电荷视在迁移率的影响, 存在一定的波动, 要得到更为详细的影响机制, 应进一步扩大数据测量范围, 特别是温度范围。

4 陷阱能级分布

国内外学者普遍认为, 空间电荷的行为特性以及分布的深度信息可以反映微观陷阱能级分布情况。针对电介质材料陷阱能级方面的研究, 国内外主要有热刺激电流法(TSC)和空间电荷分布测量方法, 从

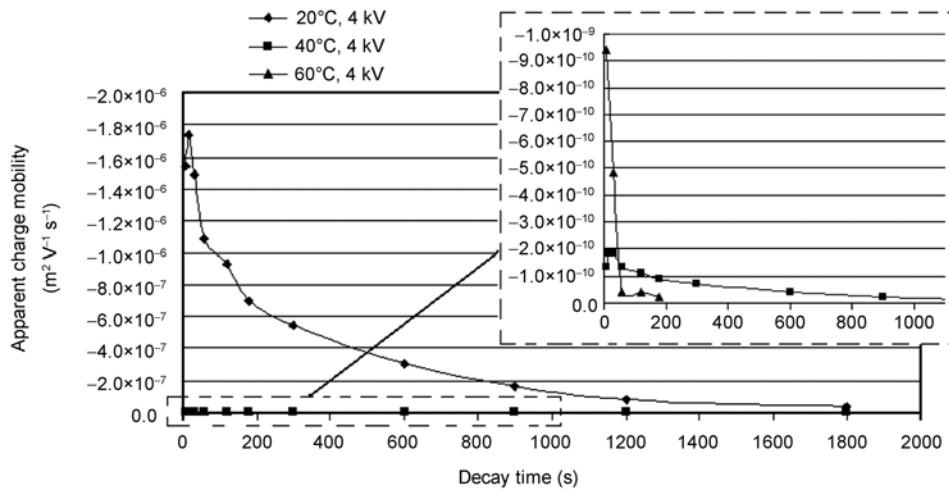


图 10 不同温度下油纸介质内部空间电荷视在迁移率与去压时间的关系

微观领域研究绝缘材料的介电性能. 近年来, 也有不少学者在探索采用 PEA 的方式获取电介质材料的陷阱能级信息. 王霞^[31]通过对老化前后试样的老化面分别进行电晕放电注入负电荷, 并采用电声脉冲法测量短路状态表面注入电荷随时间的衰减特性, 通过公式推导计算得出试样老化面的陷阱能级分布.

本节中, 参考国内外学者的相关研究经验, 基于检测固体介质中陷阱分布的等温电荷方程, 提出利用 PEA 测试结果来分析油纸绝缘介质在不同情况下的陷阱能级信息.

研究表明, 由于电荷密度和电流实际上是有相关性的, 一般情况下, 可通过表面电位测量表征材料的电荷状态. 由于电晕充电后电荷层的平均重心一般位于距材料近表面 δ 处的薄层陷阱内, 其等效面电荷密度 σ 与表面电位 V_s 存在正比关系^[32], 测得材料近表面电荷密度的大小可求得其表面电位.

$$\sigma = \varepsilon_0 \varepsilon V_s / r', \quad (4)$$

式中 σ 为等效面电荷密度; ε_0 为真空的介电常数; ε 为介质的相对介电常数; V_s 为表面电位; r' 为平均电荷重心, 取 120 pm.

由于介质表面电位衰减与电流的关系为:

$$i(t) = C \frac{dV_s(t)}{dt}, \quad (5)$$

其中, 电容 $C = \varepsilon_0 \varepsilon A / L$, A 为试样表面积, L 为试样厚度.

则可得电流密度为:

$$j = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{L} \frac{dV_s(t)}{dt} = \frac{r'}{L} \frac{d\sigma(t)}{dt}. \quad (6)$$

可见, 电流密度与电介质表面电位的倒数和表面电荷密度的倒数均成正比.

又由于电晕放电时, 陷阱中的电荷密度(电位衰减)的变化可以近似为指数衰减规律^[33]:

$$\sigma = A \cdot e^{-t/\tau}, \quad (7)$$

式中 A 为常数, τ 为衰减时间常数. 于是可得到含有衰减时间常数的电流密度变化规律:

$$|j(t)| = \frac{r' A}{L \tau} e^{-t/\tau}. \quad (8)$$

因此, 对于油纸介质来讲, 当外施电压撤去即短路后, 油纸介质中被浅陷阱入陷的载流子先释放, 处于深陷阱中的载流子后释放, 在不同温度下随时间衰减的载流子释放电流反映了试样表面的陷阱能级分布规律. 这里假设释放出的载流子不会再发生陷阱化, 则可得出陷阱能级 E_t 及电流密度 j 与陷阱密度 N_t 的关系:

$$E_t = kT \ln vt, \quad (9)$$

$$j = \frac{qLkT}{2t} f_0(E_t) N(E_t), \quad (10)$$

式中 $f_0(E_t)$ 为介质中陷阱的初始占有率, 取数值 1/2. q 为电子电量, 取 1.6×10^{-19} C; k 为波尔兹曼常数, 取

$8.568 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$; T 为绝对温度, 单位 K ; ν 为电子振动频率, 取 $3 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$; 电子陷阱的能量以导带底为零点计算, 空穴陷阱的能量以价带顶为零点计算.

如果令 $\eta_1 = \frac{qLkT}{2t} f_0(E_t)$, $\eta_2 = \frac{r'A}{L}$, 可看出 η_1 , η_2 均是常数, 则有:

$$N(E_t) = \frac{\eta_2}{\eta_1} \frac{t}{\tau} e^{-t/\tau}. \quad (11)$$

由(11)式可知, 陷阱能级密度 $N(E_t)$ 与电荷密度的衰减时间常数和衰减时间密切相关, 因此, 通过 PEA 测得油纸介质表面电荷衰减曲线, 求得其衰减时间常数, 便可由(11)式求得表面陷阱能级分布.

4.1 不同外加直流电压

通过 PEA 得到油纸绝缘介质在去掉电压后的电荷密度衰减特性之后, 根据等温电荷理论, 并结合(11)式, 即可求得油纸介质在一定能级范围的陷阱分布谱, 图 11 所示为 20°C 时不同外加直流电压下的三层油纸介质陷阱能级分布谱.

对于电介质内深浅陷阱能级的划分, 不同的研究领域不尽相同, 在国内电介质空间电荷研究领域, 比较常见的是将 1.10 eV 以下的陷阱称为浅陷阱, 而 1.10 eV 以上的陷阱称为深陷阱. 从图 11 可看到, 求得的陷阱能级在 $0.37 \sim 0.58 \text{ eV}$ 之间, 如果想要测得更低能级的陷阱分布, 根据等温电荷理论, 则需要测量极短时间的电荷. 例如要了解陷阱深度为 0.30 eV 时的信息, 则需要测量 10^{-5} s 时的等温电荷衰减, 这对于 PEA 设备来讲几乎是不能达到的. 而对于更深能级的陷阱分布, 则需要测量更长时间的等温电荷, 这一点对于 PEA 测量技术或者表面电位技术来说则更容易完成.

由于图 11 中所示的是基于三层油纸介质内全部净电荷的陷阱能级分布信息, 而如果仅仅提取其表面或者层间界面电荷衰减信息, 其极性可由表面电位符号确定, 则可获得油纸表面或者层间单一载流子的陷阱分布信息. 需要注意的是, 此处所指的陷阱信息, 是由 PEA 测试得到的油纸介质内部空间电荷所反映的陷阱信息.

从图 11 可以看出, 在 20°C 时油纸介质内部通过空间电荷密度衰减所反映的陷阱能级主要是 $0.37 \sim 0.45 \text{ eV}$ 范围内, 其密度变化分布呈现从较低能级到

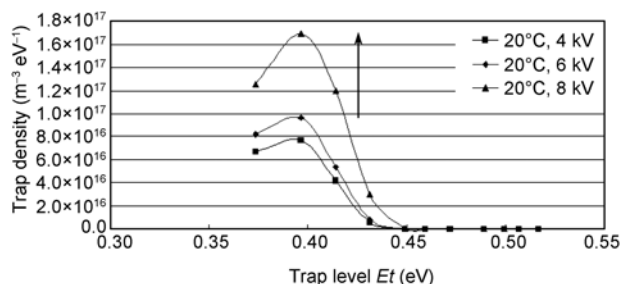


图 11 三层油纸介质内部陷阱能级分布图(20°C)

较高能级的先增加再减少的趋势, 在 0.4 eV 左右的陷阱能级具有最大分布密度, 大于 0.45 eV 的陷阱很少, 基本可以忽略.

结合电介质老化的陷阱理论^[34], 对比不同外加直流电压下的油纸介质内部陷阱能级分布可看到, 电压的升高, 使得整个分布曲线有向上移动的趋势, 显示油纸介质内部的陷阱密度受外加电压的激励而越来越大. 在高电场作用下, 电子从阴极注入到电介质的导带中, 由于其平均自由路径短, 局域态密度高, 这些注入的电子经过几次散射之后, 很快掉入陷阱中. 在电子的入陷与复合过程中, 电子从高能态移到低能态时, 多余的能量通过非辐射形式的转移, 传给另一个电子, 使后者变成热电子^[33]. 当发生空穴注入时, 空穴的陷阱所释放的能量同样通过非辐射能量转移给电子, 形成热电子. 由于热电子的产生和热电子的能量决定于陷阱的密度和深度, 改变电介质的陷阱深度或陷阱密度, 就能改变热电子的形成几率和能量, 这正是对材料改性进而提高材料的介电特性的出发点.

所以, 外加直流电压等级的升高, 油纸介质内部浅陷阱密度的增多, 会大大增加热电子的产生几率和能量, 从而增加电子运动对油纸介质内部纤维素链的破坏作用, 减低其物理化学性能, 缩短其绝缘寿命.

4.2 不同测试温度

① 40°C

当测试温度增加到 40°C 时, 油纸介质内部陷阱能级分布如图 12 所示. 可以看出, 40°C 时油纸介质内部通过空间电荷密度衰减所反映的陷阱能级主要是 $0.40 \sim 0.48 \text{ eV}$ 范围内, 与 40°C 时情况类似, 陷阱密度变化分布也是呈现从较低能级到较高能级的先增

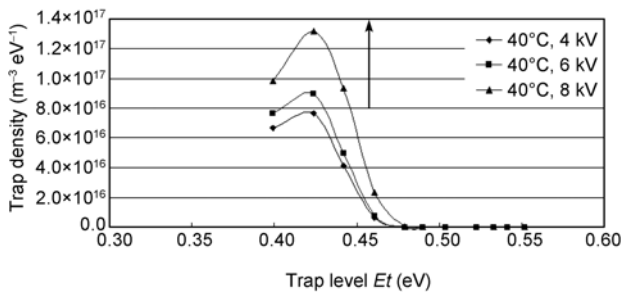


图 12 三层油纸介质内部陷阱能级分布图(40°C)

加再减少的趋势. 陷阱密度最大值位置右移到了 0.42 eV 左右, 大于 0.48 eV 的陷阱可以忽略.

② 60°C

当测试温度增加到 60°C 时, 由于电荷衰减速率相当快, 此处取出比较典型的外加 8 kV 直流电压的情况对 3 个测试温度下的陷阱能级分布进行对比. 60°C 8 kV 时, 油纸介质内部通过空间电荷密度衰减所反映的陷阱能级主要是 0.42~0.58 eV 范围内(图 13), 而其陷阱密度最大值所对应的陷阱能级为 0.51 eV, 较之 20°C 和 40°C, 陷阱能级的范围和最大值点都有所升高. 尽管测得的陷阱能级在不断增大, 比之国内外常用的深陷阱标准(1.10 eV 以上)还是要低很多, 可见, 利用 PEA 所测得的陷阱分布基本都是浅陷阱分布信息.

如图 13 所示, 测试温度的增加, 使得油纸介质内部的陷阱分布特性会发生变化, 其内部陷阱能级分布曲线有向右上方移动的趋势, 一方面, 相对较深能级的陷阱不断被激发, 温度升高导致新的较深陷阱的不断产生, 另一方面, 陷阱密度也随温度升高大幅度增加, 特别是 60°C 时增加幅度很大.

可见, 在相同的外加直流电压等级的情况下, 外界温度的升高, 油纸介质内部陷阱深度增加, 同时, 较深陷阱密度增大. 由于所测得陷阱信息实质上为浅陷阱信息, 浅陷阱密度的增加, 会大大增加油纸介

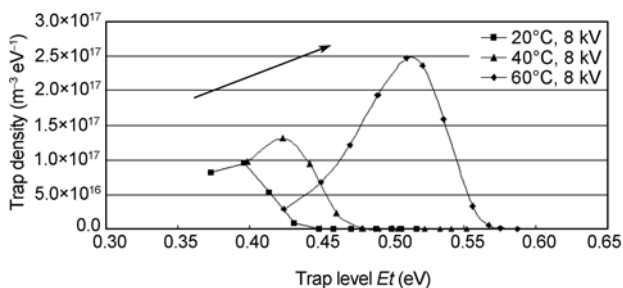


图 13 三层油纸介质内部陷阱能级分布图(60°C)

质内部热电子的产生几率和能量, 从而增加电子运动对油纸介质内部纤维素链的破坏作用; 另外, 大量的浅陷阱存在能对其局部放电行为产生较大的影响, 使材料物理化学性能劣化, 其绝缘寿命缩短.

上面的分析中, 借助国内外学者的相关科研成果, 建立了基于 PEA 的油纸绝缘介质空间电荷的去极化特性与其内部陷阱分布之间的关系, 这使得我们经由空间电荷的消散来近似获得介质内部陷阱深度信息. 尽管目前的测量结果所反映出的仅仅是浅陷阱的相关信息, 今后还有许多需要改进的地方, 但本节所采用的方法是对这方面较好的尝试.

5 空间电荷的注入、消散模式

对于油纸混合绝缘介质而言, 在外加直流电压作用下, 正负极都会发生同号电荷注入现象, 空间电荷从电极注入到油纸介质内部, 不断迁移、汇聚, 正负电荷相遇后中和, 使得油纸介质内部空间电荷总量随之变化.

而外加直流电场撤去之后, 油纸介质内部注入的空间电荷开始不断消散, 而从去压时的电荷密度变化曲线可以看到, 消散的表现形式基本是原有电荷汇聚部位处电荷密度值的不断下降, 而非电荷密度峰整体的迁移.

总体看来, 在不同外加电压、不同测试温度等多种情况下, 油纸混合绝缘介质在加压、去压过程中, 呈现出比较一致的总电荷量的增加、衰减模式, 也就是空间电荷的注入、消散模式. 特别是对于去压消散过程(图 3, 5), 采用指数方程进行拟合, 其拟合优度均在 0.95 以上, 可见其消散模式符合指数衰减规律.

对于油纸内部空间电荷的注入过程来讲, 不同的情况总电荷量变化曲线有些差异, 但是如图 14 所示, 在 4 kV 外加直流电压作用时, 在加压初期(0~100 s)这段非常短的时间, 油纸介质内部空间电荷总量快速增长, 之后出现短暂平衡状态, 加压 20 min(1200 s)后总电荷量开始逐渐下降, 之后有开始增加. 如果再继续加压, 油纸介质内部总电荷量将会达到相对平衡.

在不同外界条件作用下, 加压试验中, 油纸介质内部总电荷量变化曲线没有较为一致的规律出现的原因是, 首先, 空间电荷大量、快速注入时相当短暂的过程, 而且此过程的长短还会受到不同外界条件

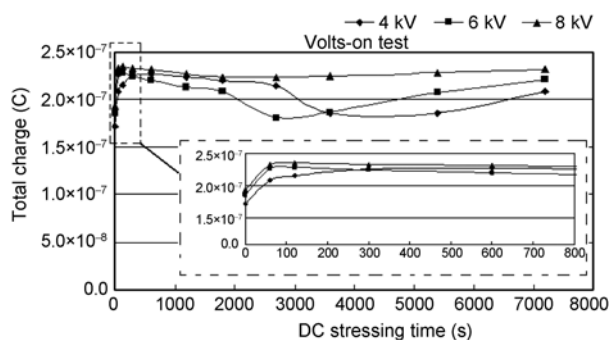


图 14 油纸介质内部总电荷量和加压时间的关系(20°C)

包括油纸绝缘介质自身不同老化程度的影响;其次,本文中,加压时间均在 1 h 以上,测试数据主要集中在空间电荷前期大量注入过程之后,主要反映的是空间电荷在油纸介质内部迁移运动导致的整体电荷量波动的过程。

因此,尽管不同外界条件下的加压过程中的油纸介质内部总电荷量的变化趋势呈现波动无序的状态,但是其空间电荷的汇聚模式应该如图 15 所示。在加压初期较短时间内($0 \rightarrow t_1$, 一般小于 30 s, 极端情况可能为几秒),油纸介质内部从没有空间电荷到有一定的电荷注入;在加压的中后期($t > t_1$),油纸介质空间电荷会有迁移、汇聚甚至中和的发生,但是总体上看,应该是一个逐渐趋于平衡的趋势。注入电荷的汇聚模式符合下式的规律:

$$y_1 = -A \cdot e^{(-t/\tau)} + B. \quad (12)$$

相比于电荷注入时的模式,油纸绝缘介质内部空间电荷消散模式其趋势比较明显(图 16)。在去掉外加电压之后,入陷电子发生退陷阱化,在去压初期 ($0 \rightarrow t_1$, 具体时间长短受外界条件及油纸介质自身老化程度的影响,可能为几分钟,也可能为几十分钟),电荷量逐渐下降,随后 ($t > t_1$),下降趋势变缓并逐渐达到最终状态。消散模式符合下式规律:

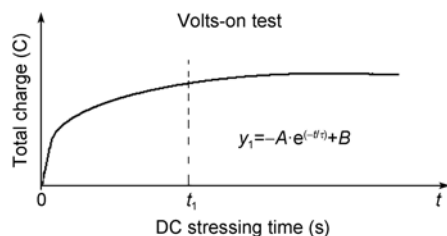


图 15 加压时油纸介质内部总电荷量增加模式

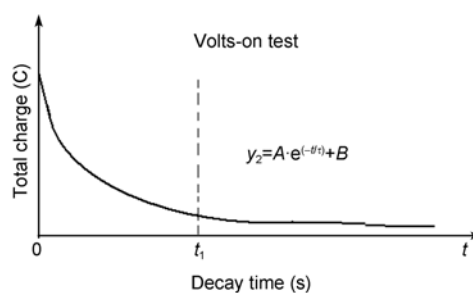


图 16 去压时油纸介质内部总电荷量衰减模式

$$y_2 = A \cdot e^{(-t/\tau)} + B. \quad (13)$$

上两式中, y_1 , y_2 分别为电荷注入、消散时油纸绝缘介质内部总电荷量; A 定义为初始幅值常数, 反映油纸绝缘介质的总电荷量的初始值, 也是油纸内部陷阱能量分布的反映; B 定义为整体幅值常数, 反映整个变化阶段油纸绝缘介质的总电荷量的幅值; τ 定义为速率常数, 反映的是电荷量增加、衰减的快慢程度。在今后的研究中, 在确定不同情况下方程中常数的值基础之上, 并针对具体情况进行相应修正, 可实现对油纸介质内部空间电荷特性的预测和模拟。

6 结论

本文基于油纸绝缘介质的直流空间电荷测试的大量前期数据及规律分析, 进行相应的数据挖掘和特征量提取, 得到了在不同外界条件下, 油纸绝缘介质的总电荷量、电荷视在迁移率、陷阱能级分布等重要特征参数的变化规律。主要结论如下。

1) 总电荷量: 加压时, 油纸介质内部电荷总量随着加压时间的延长逐渐趋于稳定; 去压时, 空间电荷总量的消散呈现指数下降规律。

2) 视在电荷迁移率: 油纸介质内部空间电荷的视在迁移速率总体上随去压时间呈不断下降的趋势。目前研究结果显示, 温度和电场对油纸介质的空间电荷视在迁移率有不同的影响机制: 在相同温度下, 较高的电场会使得空间电荷视在迁移率升高; 而在相同外加电场下, 较高温度下空间电荷视在迁移率较低。

3) 陷阱能级分布: 未老化的油纸介质内部以浅陷阱为主, 其数量远远多于深陷阱数量; 温度和电场对陷阱深度的作用机制与其对视在电荷迁移率的作用机制基本相同。本文基于等温衰减电流法建立了

油纸绝缘介质空间电荷的去极化特性与其内部陷阱分布之间的关系, 实现了经由空间电荷的消散特性来近似计算介质内部陷阱深度信息.

4) 空间电荷的注入、消散模式: 首次得到了油

纸介质在直流条件下内部空间电荷的指数增加(衰减)公式, $y = \pm A \cdot e^{(-t/\tau)} + B$, 并指明了公式中各参数的物理意义, 为实现对油纸介质内部空间电荷特性的预测和模拟提供了有益参考.

参考文献

- Boggs S. A rational consideration of space charge. *IEEE Elect Insul Mag*, 2004, 20: 22–27
- Tanaka T, Greenwood A. Effects of charge injection and extraction on tree initiation in polyethylene. *Power apparatus and systems. IEEE T Power Apparatus Syst*, 1978, 5: 1749–1759
- Maeda M, Tanaka A, Takahashi S, et al. Observation of charge behavior in organic photoconductor using pressure wave propagation method. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. Tokyo: IEEE, 1991. 19: 1036–1039
- Li Y, Murata K, Tanaka Y. Space charge distribution measurement in lossy dielectric materials by pulsed electroacoustic method. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. Brisbane: IEEE, 1994. 11: 725–728
- Tanaka R, Sunaga H, Tamura N. The effect of accumulated charge on depth dose profile in poly (Methylmethacrylate) irradiated with fast electron beam. *Nucl Sci*, 1979, 26: 4670–4675
- Hozumi N, Tanaka J, Reggi A S, et al. Space charge induced in stressed polyethylene. In: *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. Leesburg: IEEE, 1989. 12: 253–258
- Mazzanti G, Montanari G C. Quantities extracted from space-charge measurements as markers for insulation aging. *IEEE T Dielect El In*, 2003, 10: 198–203
- Montanari G C. Dielectric material properties investigated through space charge measurement. *IEEE T Dielect El In*, 2004, 11: 56–64
- Dissado L, Mazzanti G, Montanari G C. A new thermo-electrical life model based on space-charge trapping. In: *Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. Quebec: IEEE, 1996. 16: 642–645
- 刘付德, 杨百屯, 屠德民, 等. 固体电介质的电老化与击穿新理论和实验. *物理学报*, 1992, 21: 333–341
- 杨百屯, 屠德民, 刘耀南. 离子空间电荷形成的动力学过程. *西安交通大学学报*, 1991, 22: 89–96
- Li J, Zhang Y, Zheng F, et al. The structure of XLPE and the distribution of space charge. *Sci China Ser G-Phys Mech Astron*, 2003, 46: 185–190
- 郑飞虎, 张治文, 宫斌, 等. 基于碳纳米管薄膜的吸附式气体传感器的研究. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2005, 35: 689–700
- 邱勋林, 夏钟福, 王飞鹏. 聚苯二甲酸乙二醇酯的空间电荷储存及其稳定性. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2006, 9: 983–990
- 李吉晓, 张治文, 郑飞虎, 等. 交联聚乙烯的结构形态与空间电荷分布. *中国科学 A 辑: 数学*, 2002, 33: 1083–1087
- 杨盛谊, 徐征, 王振家, 等. 高场作用下有机单层器件的复合发光. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2002, 32: 191–197
- 张维国, 王坤, 刘岩, 等. 纳米无机杂化聚酰亚胺薄膜的热激电流谱特性. *哈尔滨理工大学学报*, 2004, 13: 40–42
- 卢毅, 周远翔, 梁曦东, 等. 直流复合绝缘子芯棒材料中空间电荷特性研究. *绝缘材料*, 2007, 40: 44–47
- 周远翔, 孙清华, 王宁华, 等. 空间电荷对低密度聚乙烯电气击穿特性的影响. *高电压技术*, 2008, 34: 26–31
- 周远翔, 王云杉, 王宁华, 等. 聚乙烯微观形态及表面形貌对其空间电荷包特性的影响. *高电压技术*, 2009, 35: 19–24
- Liu R, Tornkvist C, Nsson K. Space charge distribution in composite oil cellulose insulation. In: *IEEE International Conference on Dielectric Liquids*. Coimbra, Portugal: IEEE, 2005. 10: 316–321
- Liu R, Jaksts A. Moisture and space charge in oil-impregnated pressboard under HVDC. In: *IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*. Sweden: IEEE, 1998. 21: 17–22
- Morshuis P, Jeroense M. Space charge in HVDC cable insulation. In: *IEEE Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. Minneapolis: IEEE, 1997. 15: 28–32
- Morshuis P, Jeroense M. Space charge measurements on impregnated paper a review of the PEA method and a discussion of results. *IEEE Trans Electr Insul*, 1997, 13: 26–35
- Ciobanu R C, Pfeiffer W, Schreiner C. Charge packet evolution in paper-oil insulation and derived technological considerations. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. Nagoya, Japan, 2003. 12: 695–698
- Ciobanu R, Prisecaru I, Aradoaei S. PEA measurements upon cellulose materials submitted to gamma radiation. In: *International Conference on Solid Dielectrics*. France, 2004. 1: 225–228
- 王云杉, 周远翔, 李光范, 等. 油纸绝缘介质的空间电荷积聚与消散特性. *高电压技术*, 2008, 25: 873–877
- Chao T, George C, Ming F, et al. Space charge characteristics of multi-layer oil-paper insulation under different DC voltages. In: *9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. Harbin, China, 2004. 5: 914–917
- Tang C, Chen G, Fu M, et al. Effect of applied DC voltages and temperatures on space charge behavior of multi-layer oil-paper insulation. *J Phys Conf Ser*, 2009, 183: 775–784
- Chao T, George C, Ming F, et al. Space charge behavior in multi-layer oil-paper insulation under different DC voltages and temperatures. *IEEE T Dielect El In*, 2010, 17: 775–784
- 王霞. 电声脉冲法测量聚合物绝缘表面陷阱能级分布. *中国电机工程学报*, 2009, 29: 127–132
- 陈钢进, 肖慧明, 夏钟福. 电晕充电多孔 PTFE/PP 复合驻极体过滤材料的电荷存储特性. *物理学报*, 2006, 55: 2464–2469
- Zhang Y, Yang B, Tu D. Measuring distribution of carrier trap energy state density at interface of dielectric with step pressure wave method. In: *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. USA, 1989. 10: 303–308
- 王霞, 屠德民, 尹毅, 等. 固体介质中空间电荷畸变电场分布的有限元分析. *高电压技术*, 2001, 28: 51–53